

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06414

研究課題名(和文)全二重中継伝送におけるブラインド干渉抑圧法の開発

研究課題名(英文)Development of Blind Interference Suppression Methods for Full-Duplex Relaying

研究代表者

宮嶋 照行(Miyajima, Teruyuki)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：00261743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、無線通信の全二重中継伝送について、その性能劣化要因である自己干渉を抑圧する手法を検討した。まず、通信路が既知の場合の全二重中継局について、自己干渉と符号間干渉を同時に抑圧する手法を考案し、優れたスループットが得られることを確認した。次に、通信路が未知の場合の全二重中継局について、ブラインド干渉抑圧法を考案し、自己干渉抑圧能力を確認した。さらに、全二重伝送を行う基地局によるマルチユーザシステムについて、自己干渉を含む種々の干渉を抑圧する手法を考案し、その有効性を確認した。さらに、全二重中継局における無線電力収集方式を二種類考案し、送信電力を有効に利用できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線通信では限られた周波数帯域の有効利用が求められる。全二重伝送は同一周波数で同時に送受信を行うことで周波数利用効率を2倍に向上させる技術であるが、送信信号を自身で受信することによる自己干渉を抑圧することが必須である。本研究では、種々の場合について自己干渉を抑圧する手法を開発した。得られた研究成果は、次世代無線通信の周波数利用効率向上に一定の知見を与えるものである。特にパイロット信号を不要とするブラインド手法は、想定外の環境変動に自律的に適応しながら干渉を効率的に抑圧できるもので、高速大容量通信システムの実現に貢献し得るものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated methods to suppress self-interference, which is a performance-degrading factor for full-duplex relaying in wireless communication. First, we devised a method to simultaneously suppress both self-interference and inter-symbol interference for a full-duplex relaying station with channel knowledge and confirmed that excellent throughput could be obtained. Next, a blind interference suppression method was devised for a full-duplex relaying station without channel knowledge, and its self-interference suppression capability was confirmed. In addition, for a multiuser system with a full-duplex base station, we devised a method to suppress various types of interference, including self-interference, and confirmed its effectiveness. In addition, we developed two kinds of wireless energy harvesting methods for full-duplex relaying stations and showed that the transmission power can be used effectively.

研究分野：情報通信工学

キーワード：全二重中継伝送 ブラインド信号処理 適応信号処理 自己干渉抑圧

## 1. 研究開始当初の背景

第5世代(5G)移動通信システムでは、限られた周波数資源の有効利用が要求されており、周波数利用効率向上のために種々の技術が検討されている。その中で、全二重伝送は同一周波数帯で送信と受信を同時に行うため、従来の半二重伝送と比べて周波数利用効率を2倍にできる有望技術である。一方、5Gでは高周波数帯を利用することから電波の減衰が大きく、広いエリアをカバーすることが難しい。これを解決する方法が中継伝送であり、中継伝送と全二重伝送を組み合わせた『全二重中継伝送』が実現すれば、複数ユーザが広範囲で双方向通信を行うことが可能となり、周波数利用効率が更に向上する。

全二重中継伝送の性能劣化要因は、送信した信号を同時に受信することで起こる自己干渉である。全二重中継伝送の実現には自己干渉の抑圧が必要であり、信号処理により自己干渉を抑圧する手法が有望である。従来の自己干渉抑圧法では、パイロット信号を用いるが、これにより周波数利用効率が低下してしまう。具体的には、パイロット信号を用いた通信路推定に基づいた抑圧処理を行う。しかしパイロット信号は既知のトレーニング用の信号であり、これの伝送中はデータの伝送ができない。そのためパイロット信号の送信は周波数利用効率を大幅に低下させ、全二重中継伝送のメリットが消滅してしまう。パイロット信号を必要としないブラインド信号処理により自己干渉を完全に抑圧できれば、周波数利用効率の劣化を防ぐことができるが、世界的にそのような研究は無かった。

本研究では、本研究代表者のこれまでの取り組みを発展させることで、ブラインド信号処理による自己干渉抑圧法を開発し、周波数利用効率を劣化させずに全二重中継伝送の実現を目指す。また、遅延波による干渉、同時通信ユーザからの干渉、回路の不具合への対応、無線電力伝送に対する拡張も検討することで高効率移動通信システムの実現に貢献する。

## 2. 研究の目的

本研究では、全二重中継伝送における自己干渉の問題について、ブラインド信号処理による自己干渉抑圧法を提案し、移動通信システムにおける周波数利用効率の向上を目指した検討を行う。特に干渉の抑圧に線形フィルタを用いる方式を開発する。研究期間内に以下の項目を明らかにする。

(1) シングルキャリア伝送に基づく全二重中継伝送について、自己干渉に加えて、遅延波の存在により引き起こされる符号間干渉を同時に抑圧する手法を考案し、その干渉抑圧能力を理論解析と数値評価により明らかにする。

(2) 直交周波数分割多重(OFDM: Orthogonal-Frequency Division-Multiplex)に基づく全二重中継伝送について、自己干渉をブラインド処理により抑圧する手法を考案し、その性能を数値評価により明らかにする。

(3) 全二重伝送に基づく基地局によるマルチユーザシステムについて、自己干渉に加えて、符号間干渉、ユーザ間干渉を同時に抑圧する手法を考案し、その性能を数値評価により明らかにする。

(4) 全二重中継局において、無線電力収集を行う方式の設計法を二種類考案し、その性能を数値評価により明らかにする。小型の中継局の省電力化を図ることで、全二重伝送の適用可能性を広げることを目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 周波数選択性通信路におけるシングルキャリア伝送について、全二重動作する中継局において線形フィルタ処理により符号間干渉と自己干渉を抑圧する方式を検討する。まず基礎的検討として、通信路が既知の場合の設計法を二種類提案する。購入したコンピュータとソフトウェアを利用してシミュレータを作成し、提案法の性能を評価する。次に通信路の一部が未知の場合の設計法を提案し、シミュレータによる性能評価を行う。

(2) OFDMによる全二重中継局において、線形フィルタにより自己干渉を抑圧するためのブラインド適応手法を提案する。特に、送受信機に不具合が存在する場合に干渉が抑圧できることを示す。その干渉抑圧能力をコンピュータシミュレーションにより定量的に評価する。

(3) 全二重動作する基地局を用いたマルチユーザ通信において、自己干渉、符号間干渉、上りユーザ間干渉、下りユーザ間干渉を基地局に設置したフィルタで、上りユーザから下りユーザへのチャネル間干渉を下りユーザ局に設置したフィルタで抑圧する方式を提案する。特に、下りリンクユーザにおけるブラインド干渉抑圧の可能性を探る。計算機シミュレーションにより提案法の有効性を確認する。

(4) 全二重動作する中継局において、無線電力収集を行う方式を検討する。複数送受信アンテナを有する中継局が1局の場合と、単一送受信アンテナを有する中継局が複数存在する場合の二種類について、中継局に設置したフィルタの設計法を提案する。基礎的な検討として、通信路が既知の場合についてシミュレーションによる性能評価を行う。さらに通信路の一部が未知の場合へ拡張した場合についても性能評価を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 周波数選択性通信路におけるシングルキャリア伝送に基づく全二重中継伝送の同時干渉抑圧:

周波数選択性通信路におけるシングルキャリア伝送では、遅延波の存在に起因する符号間干渉が問題となる。全二重伝送を行うリレー局に設置した線形フィルタにより符号間干渉と自己干渉を抑圧するために、フィルタ設計法を二種類提案する。第一の方法は、自己干渉を完全に抑圧する条件のもとでフィルタ出力信号対干渉雑音電力比(SINR: Signal-to-Interference-and-Noise power Ratio)を最大にするものである(LI Nulling と呼ぶ)。第二の方法は、リレー送信信号は I.I.D. 信号であると仮定して SINR 最大化を反復的に行うものである(IPO と呼ぶ)。図 1 に半二重伝送に対する達成可能な伝送速度の改善度を示す。両手法ともフィルタ長が長くなるにつれて改善度が 2 倍に近づくことが確認できる。

通信路推定は多量のパイロット信号の送信を必要とするため効率を劣化させる。そこでパイロット信号の送信を抑え、通信路の一部しか利用できない場合への適用を考えた。具体的には通信路の 2 次統計量しか利用できないものとする。この場合のフィルタ設計法を考案し、性能を評価した結果を図 2 に示す。両手法とも、通信路が完全に既知の場合( $\alpha=0$ )に比べて、一部しか既知でない場合( $\alpha=0.1$ )は幾らか性能が劣化するが、ある程度の性能が確保できていることがわかる。

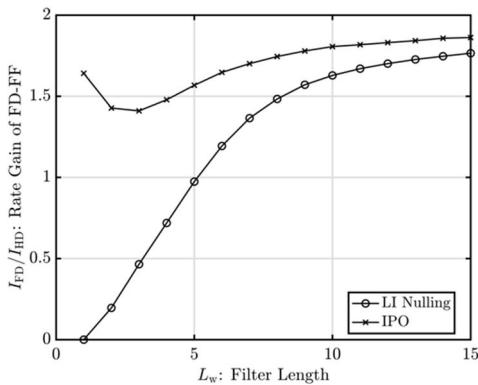


図 1. 半二重伝送に対する改善度.

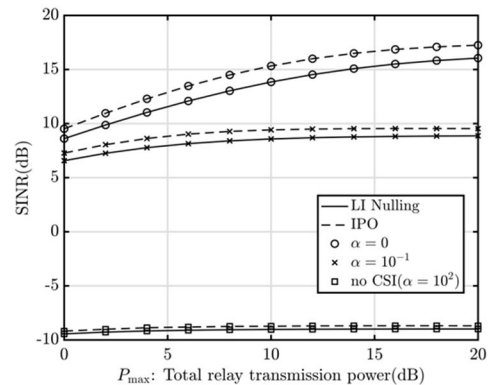


図 2. 通信路の一部のみ既知の場合の特性.

(2) OFDM に基づく全二重中継局におけるブラインド自己干渉抑圧:

OFDM ではサイクリックプリフィックス(CP)と呼ばれる冗長な信号を付加することで符号間干渉の影響を簡易な処理で取り除く。この CP を利用して中継局に設置した線形フィルタをパイロット信号を用いずに適応的に調整するブラインド自己干渉抑圧方式を提案した。受信アンテナ数を 2 本以上にすることで自己干渉を完全に抑圧できることを明らかにした。さらに、中継局の受信機において周波数依存 IQ インバランスが存在する場合と、送信アンプの非線形性が無視できない場合に、提案法により自己干渉を抑圧できる可能性を示した。それを確認するためにシミュレーションにより性能を評価した。

図 3 に IQ インバランスのゲインミスマッチ量に対するフィルタ出力 SINR の特性を示す。従来法はミスマッチ量が大きくなるにつれて劣化するのに対して、提案法はミスマッチ量によらない性能が得られている。図 4 に送信アンプの IBO に対する SINR 特性を示す。非線形性が強くなる(BO が小さくなる)につれて、従来手法は大きく劣化するが、提案法の性能はほとんど変化しないことがわかる。

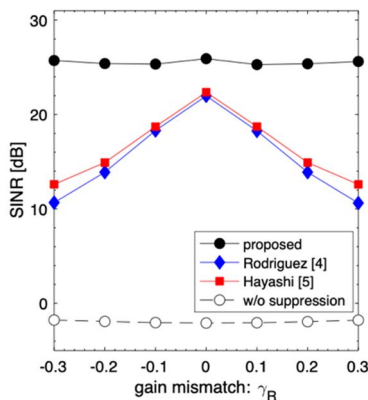


図 3. IQ インバランスの影響.

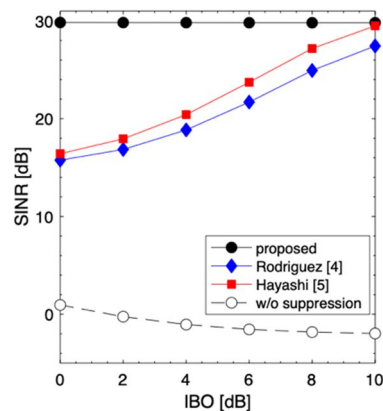


図 4. 送信アンプの非線形性の影響.

(3) 全二重基地局を用いたマルチユーザ通信における同時干渉抑圧:

基地局が全二重通信を行うマルチユーザシステムを検討した。これは中継の問題ではないが、

中継局を介したマルチユーザ通信の検討の準備段階として行ったものである。簡単のため単一セルを考え、上りリンクと下りリンクユーザが複数存在するものとした。周波数選択性通信路におけるシングルキャリア伝送を考えた。この場合、基地局の受信機では、符号間干渉、自己干渉、上りユーザ間の干渉を抑圧する必要がある。提案法では、基地局受信機に設置された線形フィルタの出力 SINR を最大化することでこれらの干渉を抑圧する。また下りリンクユーザの受信機では、符号間干渉、下りユーザ間の干渉、上りユーザ送信信号によるチャンネル間干渉を抑圧する必要がある。提案法では、基地局送信機に設置したフィルタを、通信路のヌル空間を利用して符号間干渉とユーザ間干渉を抑圧するように決定する。さらに下りリンクの受信機では、チャンネル間干渉を抑圧するようにフィルタを決定する。このとき下りリンクユーザは上りリンクユーザとの間の通信路を知る必要なく（ブラインド処理で）フィルタを決定できる。

図 5 に基地局送信電力に対する下りリンク伝送速度を示す。下りリンクユーザでフィルタによる干渉抑圧 (FD {MMSE, MVDR, GSC}) をすることで、フィルタを用いない場合 (FD w/o DMU Filter) より伝送速度が劇的に向上する。またブラインド処理 (FD GSC) はブラインド処理でない場合 (FD MMSE) より幾らか劣化するものの、半二重伝送 (HD) に比べて高い伝送速度を達成可能である。図 6 に上りリンク伝送速度について OFDM を用いた場合との比較を示す。OFDM は符号間干渉の影響を受けない利点があるが CP を利用するため伝送速度が劣化する。この結果より CP を用いないシングルキャリア伝送の優位性が確認できる。

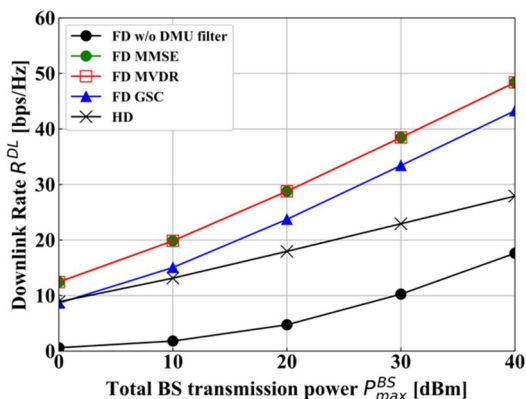


図 5. 下りリンク速度特性.

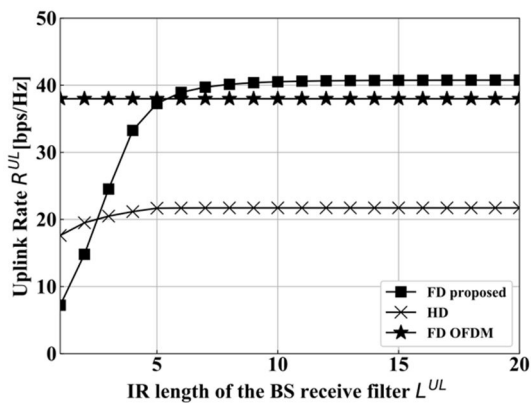


図 6. OFDM との上りリンク速度比較.

#### (4) 全二重動作する中継局における無線電力伝送:

中継局が全二重通信を行う場合は自己干渉が発生するが、これをエネルギーとして収集して再利用することを考えた。通信としては半二重伝送であるが、全二重伝送における無線電力伝送の準備段階として行ったものである。まず、複数の送受信アンテナを有する中継局が一局の場合を検討した。中継局は線形フィルタを持ち、符号間干渉を抑圧しながら、電力の収集を効果的に行う。通信路が完全に既知の場合にフィルタ出力 SINR を最大化するようにフィルタを決定する方法を提案し、さらに通信路の 2 次統計量しか利用できない場合へ拡張した。図 7 にエネルギー再利用をしない場合との性能比較を示す。全二重動作によりエネルギー再利用することで性能が向上する様子が確認できる。図 8 に送信機送信電力に対する受信機でのビット誤り率 (BER) 特性を示す。通信路が完全に既知の場合 ( $\alpha = 0$ ) に比べて、2 次統計量しか利用できない場合 ( $\alpha$  が非 0) は幾らか性能が劣化するものの一定の特性が得られている。

単一送受信アンテナを持つ中継局が複数存在する場合も検討し、中継局が増加するにつれて性能が向上することを明らかにしている。

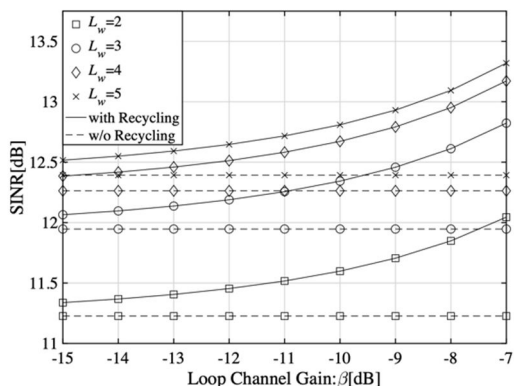


図 7. エネルギー再利用の効果.

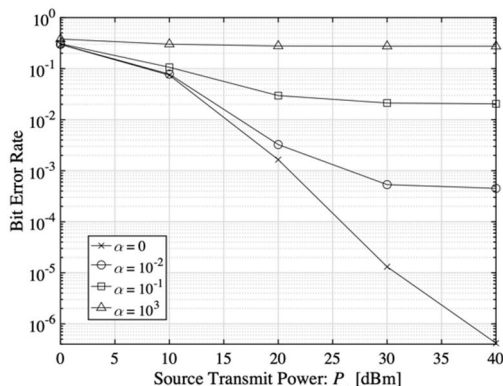


図 8. 通信路の一部のみ既知の場合の特性.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Junta Furukawa, Teruyuki Miyajima, Yoshiki Sugitani	4. 巻 9
2. 論文標題 Wireless energy harvesting networks with multiple filter-and-forward relays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2020XBL0009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shogo Koyanagi, Teruyuki Miyajima	4. 巻 E102.A
2. 論文標題 Filter-and-Forward-Based Full-Duplex Relaying in Frequency-Selective Channels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 177 ~ 185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Teruyuki Miyajima, Hayato Teshimomori, Yoshiki Sugitani	4. 巻 9
2. 論文標題 Adaptive Self-Interference Suppression for Full Duplex Filter-and-Forward Relaying	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 1701 ~ 1704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2020.3001656	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kyohei Amano, Teruyuki Miyajima, Yoshiki Sugitani	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Filter Design for Full-Duplex Multiuser Systems Based on Single-Carrier Transmission in Frequency-Selective Channels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 235 ~ 242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020WBP0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Junta Furukawa, Teruyuki Miyajima, Yoshiki Sugitani	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Wireless-Powered Filter-and-Forward Relaying in Frequency-Selective Channels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1095 ~ 1102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019EAP1150	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 天野匡平, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 周波数選択性通信路における全二重基地局のための干渉抑圧フィルタ
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川純汰, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 自己エネルギー再利用を行うフィルタ転送型MIMOリレー
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小柳匠冴, 宮嶋照行
2. 発表標題 全二重フィルタ転送型リレーの設計について
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 天野匡平, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 アップリンクMU-MIMOのための干渉抑圧フィルタ設計法
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川純汰, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 通信路の二次統計量に基づく無線給電型フィルタ転送リレー
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 天野匡平, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重基地局における干渉抑圧フィルタ設計法の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古川純汰, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 自己エネルギー再利用を行うフィルタ転送型リレーの一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天野匡平, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重マルチユーザMIMOにおける干渉抑圧フィルタ
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生研究発表会論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川純汰, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 自己エネルギー再利用を行うフィルタ転送型リレーの性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 天野匡平, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重マルチユーザMIMOにおけるフィルタとUplinkユーザ選択の同時決定法の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古川純汰, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 SWIPTのための全二重EHを用いるFFリレーの提案
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Shogo Koyanagi, Teruyuki Miyajima
2. 発表標題 Filter-and-Forward Based Full-Duplex Relay Networks with Cooperative Beamforming
3. 学会等名 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 手代森勇人, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 単一周波数全二重リレーのための適応通信路短縮を用いた同時干渉抑圧の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小柳匠冴, 宮嶋照行
2. 発表標題 リレー間干渉を考慮した全二重フィルタ転送型リレー
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 手代森勇人, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重フィルタ転送における適応自己干渉抑圧の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 手代森勇人, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重フィルタ転送における適応自己干渉抑圧について
3. 学会等名 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 手代森勇人, 宮嶋照行, 杉谷栄規
2. 発表標題 全二重FFリレー伝送における適応自己干渉抑圧へのIQインバランスの影響
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関